نشریه مهندسی عمران فردوسی،۳۶، ۳، ۱۴۰۲. (۲۹-۴۶)



نشریه مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/



انجمن بتن ایران



انجمن مهندسی روسازی ایران

ارزیابی عملکرد قاب خمشی جوشی با مقطع تیر کاهش‌یافته و سخت‌کننده*

مقاله پژوهشی

محمدامین جلالی[۱]   امین رفیعی[۲]

DOI: 10.22067/jfcei.2023.82042.1224

چکیده در این پژوهش، تأثیر برش‌های بیضوی در جان و شعاعی در بال و نیز سخت‌کننده، بر رفتار تیر، اتصال و قاب خمشی فولادی مطالعه می‌شود. با روش اجزاء محدود و المان‌های سه‌بعدی در ABAQUS تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی قاب تحت بارگذاری چرخه‌ای انجام و از معیار شکست فون-مایزز استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد در تیر بدون مقطع کاهش یافته بیشینه تنش‌ها و کرنش‌ها در جان تیر رخ می‌دهد و با ایجاد برش در جان، بیشینه تنش‌ها و کرنش‌ها به محل مقطع تیر کاهش یافته انتقال می‌یابد. نسبت مقاومت بیشینه به مقاومت در گام نهایی بارگذاری و نیز میزان انرژی مستهلک شده نشان می‌دهد، در مقایسه با اتصال با برش شعاعی، اتصال با برش بیضوی تنزل مقاومت کمتر و شکل‌پذیری بیشتری دارد.

واژه‌های کلیدی تیر مقطع کاهش یافته، سخت کننده، بارگذاری چرخه‌ای، روش اجزاء محدود غیرخطی.

Performance Evaluation of Welded Moment Frame with Reduced Beam Section and Stiffener

Mohammad-Amin Jalali   Amin Rafiee

Abstract *In this research, the effect of the elliptical web reduction and radial flange reduction and also the stiffener, on the behavior of beam, connection and steel moment frame is studied. By using Finite-Elements Method and 3D elements in ABAQUS, the nonlinear-static analyses of the frame under cyclic loading are carried out and the Von-Mises criterion is checked. The results show that in the beam with no reductions, maximum stresses and strains occur in the web. By reducing the web section of the beam, maximum stresses and strains are transferred to the location of the reduced section. The ratio of maximum strength to the strength at the final step of loading, and also, the value of dissipated energy, show that, in comparison with the connections with radial-shaped reductions, the connections with elliptical-shaped reductions have less strength degradation and more ductility.*

Key Words Reduced beam section; Stiffener; Cyclic loading; Nonlinear finite-elements method.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۱/۳۱و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۴/۵می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی‌ارشد عمران-سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

(۲) نویسنده مسئول: استادیار گروه عمران-سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

Email: a.rafiee@maragheh.ac.ir

مقدمه

به دنبال زلزله نورتریج تحقیقات مختلفی با هدف تفسیر چگونگی وقوع خرابی‌های پدید آمده و تعیین چگونگی تعمیر ساختمان‌های آسیب دیده به عمل آمد و بررسی طرح‌های گوناگون جدید به منظور دست‌یابی به عملکرد رضایت‌بخش در اتصالات شروع شد [1]. بر اساس نتایج این تحقیقات دو استراتژی، تضعیف موضعی مقطع تیر و تقویت اتصال، به منظور دور نمودن محل تشکیل مفصل از ناحیه بحرانی اتصال که همان بر ستون می‌باشد، اتخاذ شد و بر پایه این دو استراتژی انواع اتصالات پس از زلزله نورتریج ارائه گردید. این اتصالات پیشنهادی شامل اتصال خمشی با ورق کناری، اتصال با مقطع تیر کاهش یافته، اتصال ماهیچه‌ای، اتصال تقویت شده با پشت بند، اتصال صلب پیچی با سپری انتهایی، اتصال صلب پیچی با صفحه انتهایی، اتصال با مقطع تیر کاهش یافته و اتصال خمشی پس‌کشیده می‌باشد. نتایج تحقیقات انجام شده بر روی انواع مختلف این اتصالات نشان دهنده موثر بودن آنها در انتقال مفصل پلاستیک تیر به بیرون از ناحیه چشمه اتصال، ظرفیت دورانی بالا، شکل‌پذیری و جذب انرژی بالای آن‌ها است.

به علت صرف وقت و هزینه بیشتر به دلیل ساخت و بازرسی جوش و نیاز به عناصر اضافی و مشکلات معماری در استراتژی اول، انتخاب گزینه دوم ضروری به نظر می‌رسد. در اتصالات با مقطع کاهش یافته به منظور حصول رفتار لرزه‌ای مطلوب، استراتژی تضعیف موضعی مقطع تیر اتخاذ شده است [2]. اتصالات با مقطع کاهش یافته به دلیل رفتار شکل‌پذیر ،جذب انرژی بالا و کاهش هزینه نسبت به روش‌های دیگر مورد استقبال بیشتر طراحان و فعالان صنعت ساختمان گردید.

مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط چن و همکاران نشان می‌دهد که کاهش سختی قاب‌های خمشی در اثر استفاده از اتصالات RBS به جای اتصالات خمشی معمولی، تنها ۳ درصد است که پذیرفتنی و قابل قبول است [3]. جونز و همکاران [4] بر طبق مطالعات خود به این نتیجه رسیده‌اند که جوش دادن جان تیر به بال ستون احتمال شکست جوش را در اتصالات RBS کاهش می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل از مطالعات ژانگ و ریکلز [5] دال کف کامپوزیت، قید برای تیرها مهیا می‌کند و با جلوگیری از حرکت جانبی بال، ناپایداری تیر را در ناحیه‌ی RBS کاهش می‌دهد. همچنین بر اساس نتایج این تحقیق مقاومت چشمه‌ی اتصال یکی از عوامل موثر در میزان گشتاور پیچشی ستون بوده و مهار جانبی مکمل می‌تواند به اندازه دال کامپوزیت کف در کاهش کمانش جانبی RBS موثر باشد. بر اساس تحقیق سواتی و همکاران[6] اتصالات با مقطع کاهش‌یافته شعاعی شکل در پروفیل‌های هندی باعث افزایش شکل-پذیری و انتقال مفصل پلاستیک به داخل تیر می‌شود. مطالعات پاکومیز و همکاران [7] بر روی عملکرد اتصالات با تیر مقطع کاهش یافته ساخته شده از پروفیل‌های اروپایی نشان می‌دهد نیاز به بازبینی مجدد در مشخصات هندسی مقطع کاهش یافته پیشنهاد شده در آیین‌نامه اروپا وجود دارد [8,9]. سوفیا و همکاران[10] با درنظرگرفتن مشخصات هندسی ناحیه کاهش‌یافته خارج از محدودیت‌های پیشنهادی توسط آیین‌نامه EC8 نتیجه گرفتند اتصالات با مقطع کاهش‌یافته دارای شکل‌پذیری مناسبی هستند [11]. بر اساس مطالعات داورپناه و همکاران [12] نیاز به تحقیقات بیشتری به منظور استفاده از متغیرهای ناحیه کاهش‌یافته پیشنهادی توسط آیین‌نامه AISC، در پروفیل‌های فولادی رایج در ایران وجود دارد [13-15].

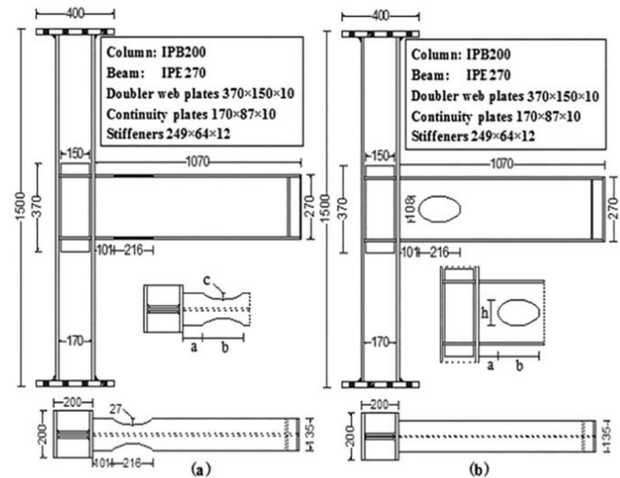
از میان پژوهش‌های اخیری که به موضوع مطالعه رفتار تیرها، اتصالات و قاب‌های با تیر RBS و RWS پرداخته‌اند، می‌توان به مراجع [16-21] اشاره کرد. با این حال، در پژوهش‌های بسیار معدودی به مطالعه اثر سخت‌کننده بر رفتار این تیرها پرداخته شده است. مطالعه اثر سخت‌کننده صرفا بر اتصالات دارای تیر RBS را می‌توان در پژوهش‌هایی همچون کانائو و همکاران [22] و رودسری و همکاران [23] یافت. با توجه به مرور فوق بر پژوهش‌های پیشین، هدف از تحقیق حاضر، بررسی عملکرد قاب خمشی جوشی با مقطع تیر مقطع کاهش‌یافته در جان، تحت بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد.

صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی اجزاء محدود با مدل آزمایشگاهی

در این بخش برای صحت‌سنجی، نمونه آزمایشگاهی داورپناه و همکاران [14] مورد بررسی قرار می‌گیرد. طبق شکل (۱) در این تحقیق دو نمونه اتصال تیر به ستون که به وسیله جوش به همدیگر متصل شده‌اند، در نظر گرفته می‌شود. یک اتصال با کاهش در مقطع بال تیر (شکل1-a) و یک اتصال با کاهش در مقطع جان تیر (شکل-1 b) ساخته شد.

در نمونه‌ها از تیر با IPE270 و ستون با IPE200 استفاده شده است. ابعاد ورق پیوستگی، سخت کننده‌ها و ورق مضاعف یا تقویتی

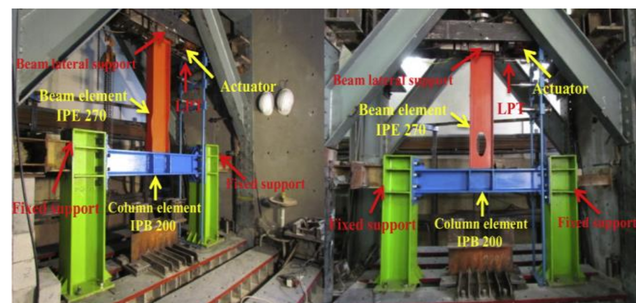
جان به ترتیب P170×87×10، P249×64×12 و P370×150×10 می‌باشد. مشخصات مقاطع کاهش‌یافته تیر در جدول (۱) [14] و پارامترها در داخل شکل (۱) معرفی شده‌اند. شکل (۲) روند آزمایش دو نمونه را نشان می‌دهد. در این شکل همچنین مشخصات کلی تیر و ستون معرفی شده است.



شکل ۱ دو نمونه آزمایشگاهی اتصال تیر به ستون [14]

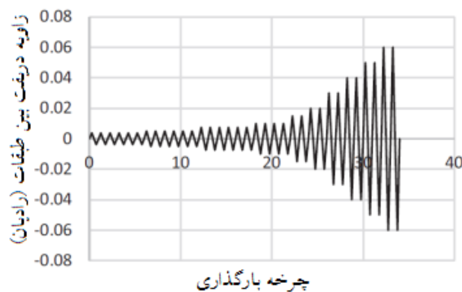
جدول ۱ مقدار پارامترهای کاهش یافته تیر

h	c	b	A	پارامتر
0.4db =108	0.2bf =27	0.8db =216	0.75bf =101	اندازه (mm)

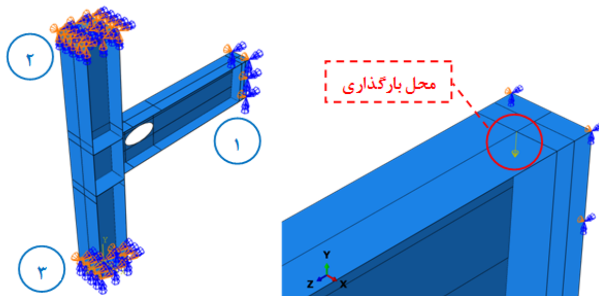


شکل ۲ روند انجام آزمایش در آزمایشگاه [14]

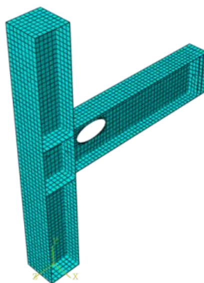
شرایط مرزی باید مشابه نمونه آزمایشگاهی معرفی شوند. در این راستا، مطابق با نمونه آزمایشگاهی در بالا و پایین ستون تکیه‌گاه تعریف شده است. بارگذاری به صورت چرخه‌ای و مطابق پروتکل بارگذاری AISC 341 [24] اعمال شد که در شکل (۳) نشان داده شده است. بارگذاری اعمالی بر ابتدای تیر در شکل (۴) نشان داده شده است. در مدل شکل (۴-الف) شرایط مرزی در محل‌های ۱، ۲ و ۳ با توجه به جهت محورهای مختصات عبارتند از: در محل ۱) $U_x = U_{Ry} = U_{Rz} = 0$؛ در محل ۲) $U_x = U_y = U_z = U_{Ry} = U_{Rz} = 0$ و در محل ۳) $U_x = U_z = U_{Ry} = U_{Rz} = 0$. در این مدلسازی از المان Shell نوع S4R انتخاب شده است. المان S4R یک المان سه‌بعدی و هشت گرهی است که در آن از روش انتگرال‌گیری کاهش‌یافته به منظور حل انتگرال‌ها استفاده می‌شود (شکل ۴-ب).



شکل ۳ پروتکل بارگذاری [24]



(الف)

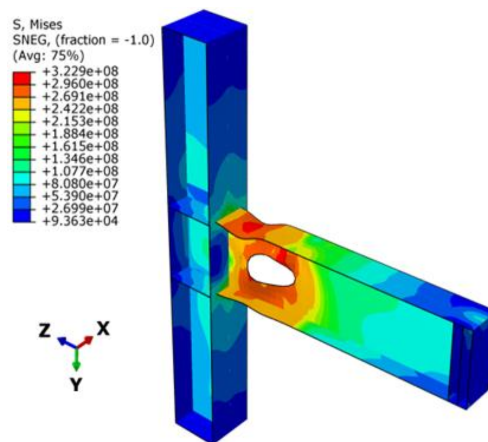


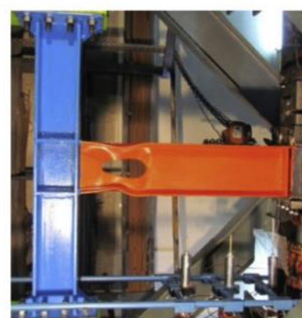
(ب)

شکل ۴ مدل عددی پژوهش حاضر: (الف) ساخت شرایط مرزی و بارگذاری؛ (ب) مش‌بندی مدل از نوع S4R

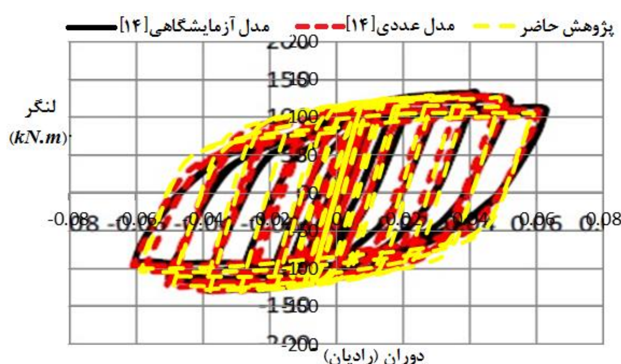
تغییرشکل و توزیع تنش رخ داده در نمونه آزمایشگاهی و مدل اجزاء محدود در شکل (۵) نشان داده شده است. شکل (۶) نیز

تطابق مناسب نمودارهای لنگر–دوران نمونه آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.





شکل ۵ تطابق نتایج مربوط به نمونه آزمایشگاهی و مدل اجزاء محدود

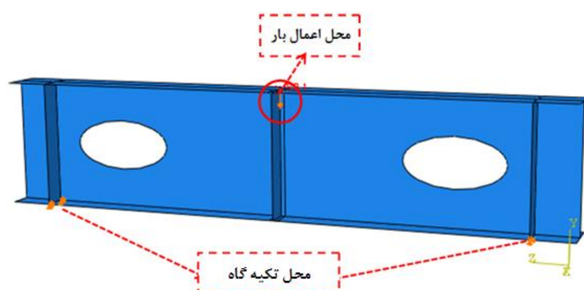


شکل ۶ مقایسه نتایج اجزاء محدود تحقیق حاضر با نمونه مرجع

مدل‌سازی نمونه‌های پیشنهادی

مطالعه عددی بر متغیرهای ناحیه کاهش یافته تیر با برش بیضوی

طول دهانه تیر مورد نظر ۲/۴ متر می‌باشد. مقطع تیر مورد استفاده IPE 600 انتخاب شد. محل اعمال بارگذاری و تکیه‌گاه‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است. در مدل شکل (۷) شرایط مرزی در محل تکیه‌گاه‌ها با توجه به جهت محورهای مختصات عبارت است از: $U_x = U_y = U_z = 0$؛ مشخصات مکانیکی فولاد، مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۷ تیر با مقطع کاهش یافته

در این بخش، به بررسی تأثیر متغیرهای هندسی ناحیه‌ی کاهش یافته بر عملکرد تیر و تعیین متغیرهای بهینه پرداخته می‌شود. تیر مورد مطالعه در تحلیل‌های پارامتریک لازم است به گونه‌ای طراحی شود که شرایط ایجاد مفصل پلاستیک تیر در فاصله‌ای محدود از بر ستون فراهم شود. به این منظور، معمولا فاصله مرکز مفصل پلاستیک تیر از بر ستون بر اساس توصیه‌های آیین‌نامه‌ای برابر عمق تیر (d_b) در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این نکته مشخصات هندسی مدل‌ها مطابق جدول (۳) در نظر گرفته شدند. در این جدول، FBS معرف تیر بدون مقطع کاهش یافته، RWS-E معرف تیر مقطع کاهش یافته در جان به روش برش بیضوی، عدد اول معرف اندازه فاصله ابتدای ناحیه‌ی کاهش یافته از بر تکیه‌گاه بر حسب نسبتی از عمق تیر، عدد دوم نماینده‌ی طول ناحیه‌ی کاهش‌یافته بر حسب نسبتی از عمق تیر و عدد آخر معرف اندازه عمق ناحیه کاهش‌یافته بر حسب نسبتی از عمق تیر می‌باشد. برای مثال RWS-0.2-0.8-0.4 تیر با برش بیضوی در جان است که $a = 0.2d_b$، $b = 0.8d_b$ و $h = 0.4d_b$.

جدول ۲ مشخصات مکانیکی مدل الاستوپلاستیک برای فولاد [14]

نوع مقطع	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
بال تیر	۲۶۵,۱	۴۰۵,۳	۱۹۶,۵
جان تیر	۲۵۰,۳	۳۹۸,۴	۱۹۱,۳
بال ستون	۲۸۶,۶	۴۱۵,۸	۱۹۸,۷
جان ستون	۲۹۵,۵	۴۰۳,۲	۱۹۶,۳

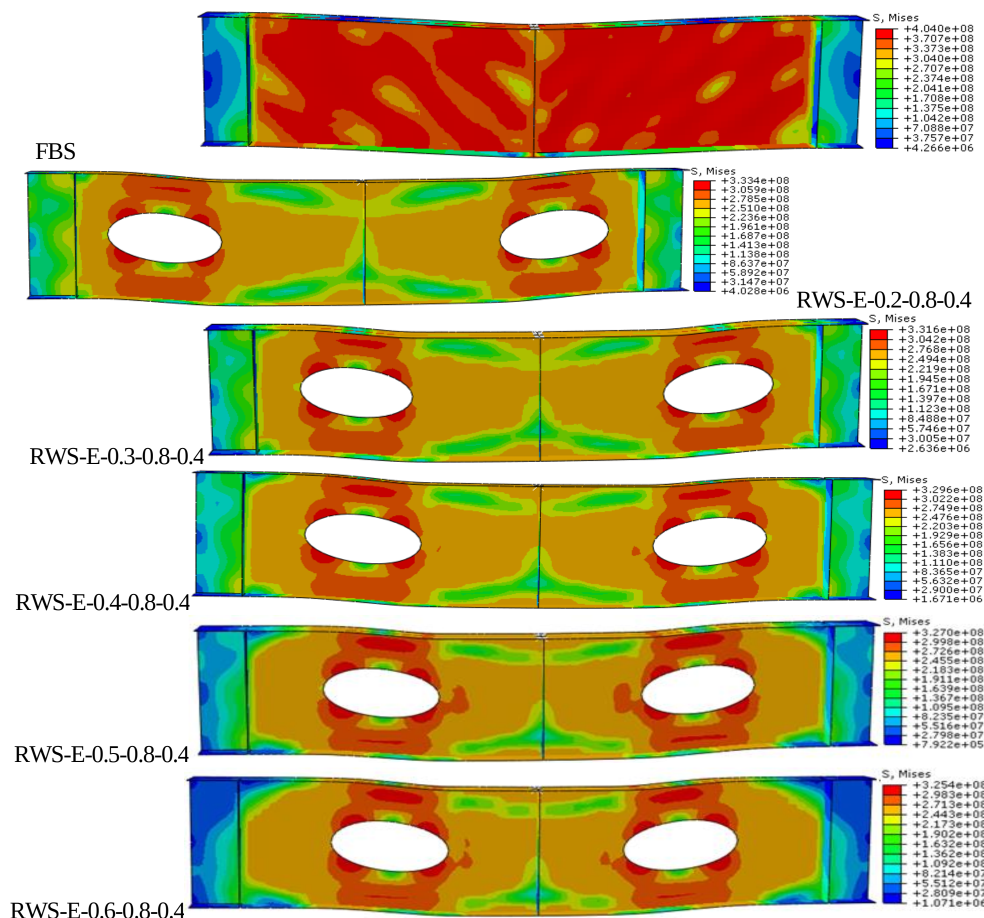
جدول ۳ جزئیات متغیرهای هندسی ناحیه‌ی کاهش‌یافته‌ی تیر با برش بیضوی

h (mm)	b (mm)	a (mm)	نمونه	
-	-	-	FBS	
۱۰۸	۲۱۶	۵۴	RWS-E-0.2-0.8-0.4	گروه الف
۱۰۸	۲۱۶	۸۱	RWS-E-0.3-0.8-0.4	
۱۰۸	۲۱۶	۱۰۸	RWS-E-0.4-0.8-0.4	
۱۰۸	۲۱۶	۱۳۵	RWS-E-0.5-0.8-0.4	
۱۰۸	۲۱۶	۱۶۲	RWS-E-0.6-0.8-0.4	
۱۰۸	۱۳۵	۱۰۸	RWS-E-0.4-0.5-0.4	گروه ب
۱۰۸	۱۶۲	۱۰۸	RWS-E-0.4-0.6-0.4	
۱۰۸	۱۸۹	۱۰۸	RWS-E-0.4-0.7-0.4	
۱۰۸	۲۱۶	۱۰۸	RWS-E-0.4-0.8-0.4	
۱۰۸	۲۴۳	۱۰۸	RWS-E-0.4-0.9-0.4	
۵۴	۲۱۶	۵۴	RWS-E-0.4-0.8-0.2	گروه ج
۸۱	۲۱۶	۸۱	RWS-E-0.4-0.8-0.3	
۱۰۸	۲۱۶	۱۰۸	RWS-E-0.4-0.8-0.4	
۱۳۵	۲۱۶	۱۳۵	RWS-E-0.4-0.8-0.5	
۱۶۲	۲۱۶	۱۶۲	RWS-E-0.4-0.8-0.6	

برای تعیین مقادیر بهینه متغیرهای ناحیه‌ی کاهش‌یافته، مدل‌ها در سه گروه بررسی می‌شوند: در گروه الف، متغیرهای طول برش بیضوی (b) و عمق برش بیضوی (h) مطابق با نمونه آزمایشگاهی ثابت در نظر گرفته می‌شود و فاصله ابتدای ناحیه‌ی کاهش یافته از بر ستون (a) تغییر می‌یابد؛ در گروه ب، متغیرهای a و h ثابت می‌باشند و متغیر b تغییر می‌یابد؛ و در گروه ج، متغیرهای a و b ثابت می-باشند و متغیر h تغییر خواهد یافت.

بررسی نتایج

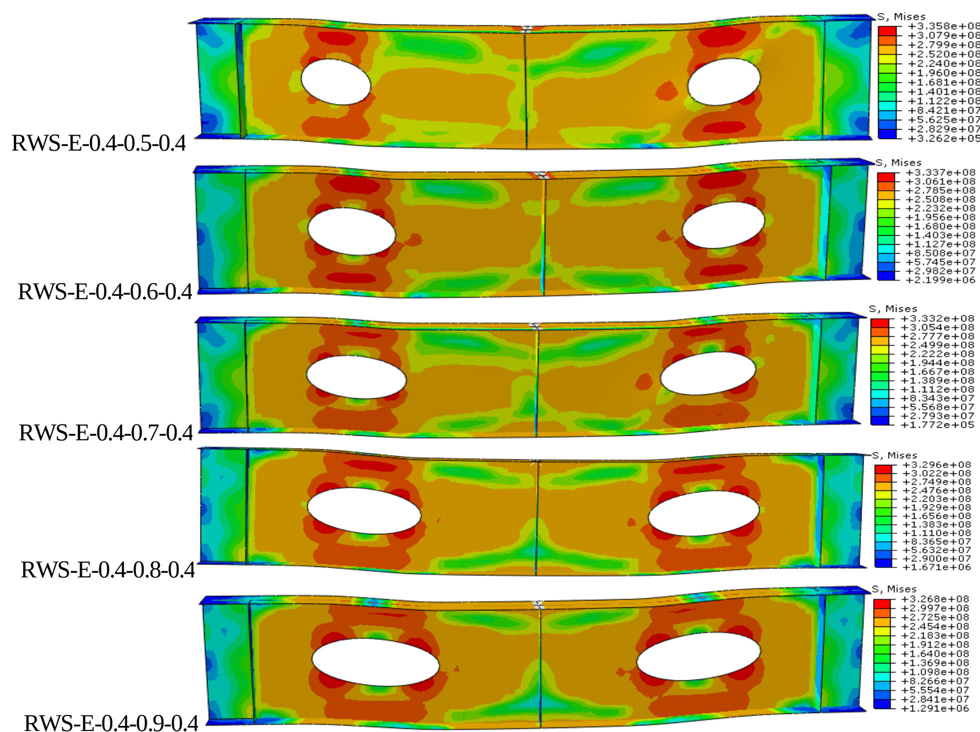
تغییرشکل و توزیع تنش فون میزز رخ داده در تیرهای گروه الف در شکل (۸) ارائه شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است در تیر بدون مقطع کاهش یافته بیشترین تنش‌ها در جان تیر رخ داده است و با ایجاد برش بیضوی در جان ماکزیمم تنش‌ها به محل مقطع کاهش یافته انتقال می‌یابد. همچنین نتایج این بخش نشان می‌دهد با دور شدن محل بازشو از تکیه‌گاه مقدار تنش رخ داده در تیر کمی کاهش می‌یابد.



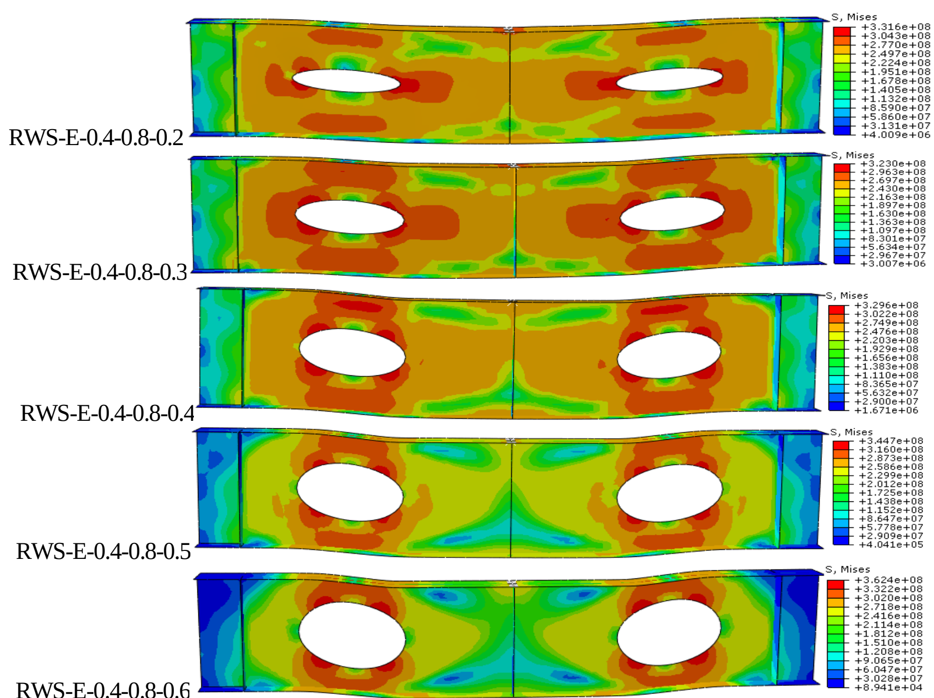
شکل ۸ تغییرشکل و توزیع تنش فون میزز (Pa) رخ داده در تیرهای گروه الف

شکل (۹) تغییرشکل و توزیع تنش فون میزز در تیرهای گروه ب را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج این شکل بیشترین تنش‌ها در محل بازشو رخ داده است. همچنین با افزایش طول بازشو تنش‌ها مقدار کمی کاهش می‌یابد.

تغییرشکل و توزیع تنش فون میزز رخ داده در تیرهای گروه ج در شکل (۱۰) ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است ماکزیمم تنش‌ها در محل مقطع کاهش یافته تیر رخ داده است. با دقت در نتایج درمی‌یابیم که تا عمق بازشو به مقدار ۳۰ تا ۴۰ درصد ارتفاع مقطع، مقدار تنش‌ها روند نزولی دارد و پس از آن روند صعودی شده است.

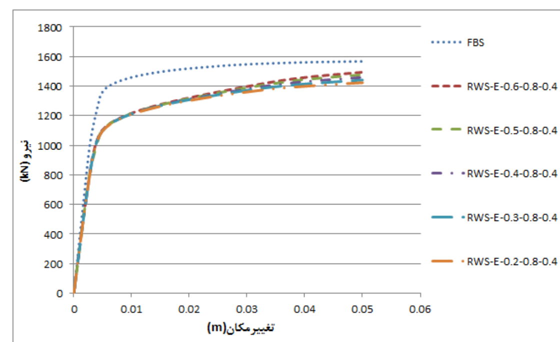


شکل ۹ تغییرشکل و توزیع تنش فون میزز (Pa) رخ داده در تیرهای گروه ب

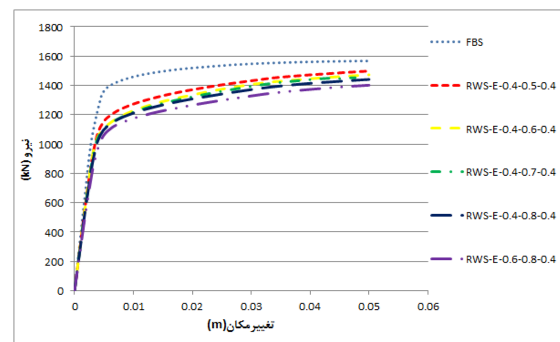


شکل ۱۰ تغییرشکل و توزیع تنش فون میزز (Pa) رخ داده در تیرهای گروه ج

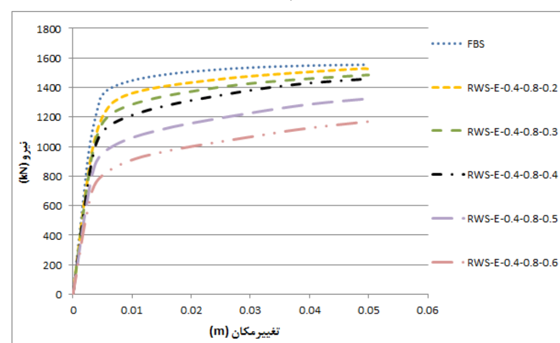
منحنی نیرو–تغییرمکان مدل‌های گروه الف در شکل (۱۱–الف) ارائه شده است. بر اساس این شکل با ایجاد بازشو در جان ظرفیت باربری تیر کاهش می‌یابد. همان‌طور که از نتایج این شکل مشخص است با دور شدن محل بازشو از تکیه‌گاه ظرفیت باربری مقداری افزایش می‌یابد. تأثیر طول بازشو بر منحنی نیرو– تغییرمکان تیر در مدل‌های گروه ب مطابق شکل (۱۱–ب) بررسی شده است. نتایج این شکل نشان می‌دهد که با افزایش طول بازشو ظرفیت باربری مقداری کاهش می‌یابد. منحنی نیرو–تغییرمکان مدل‌های گروه ج در شکل (۱۱–ج) ارائه شده است. بر اساس این شکل با افزایش عمق بازشو ظرفیت باربری تیر کاهش می‌یابد، (خصوصا تیرهای با بازشوهای به عمق‌های ۵۰ و ۶۰ درصدی ارتفاع تیر).



(الف)



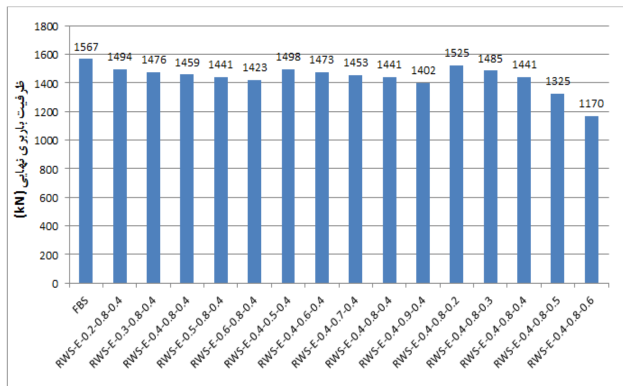
(ب)



(ج)

شکل ۱۱ منحنی نیرو–تغییرمکان: (الف) مدل‌های گروه الف؛ (ب) مدل‌های گروه ب؛ (ج) مدل‌های گروه ج

ظرفیت باربری مدل‌ها در نمودار میله‌ای شکل (۱۲) ارائه شده است. بر اساس نتایج این شکل تغییرات عمق بازشو بیشترین تأثیر را بر ظرفیت باربری تیر دارد. به گونه‌ای که ایجاد بازشو با عمق ۲۰ تا ۶۰ درصد ارتفاع تیر سبب کاهش ظرفیت باربری تیر به میزان ۲/۷ تا ۲۵ درصد نسبت به تیر بدون مقطع کاهش یافته می‌شود.



شکل ۱۲ ظرفیت باربری مدل‌ها

مطالعه عددی بر عملکرد چرخه‌ای اتصالات FBS، RBS-R و RWS-E

در این بخش از تحقیق به بررسی تأثیر عمق برش بال و جان بر عملکرد چرخه‌ای این اتصالات پرداخته می‌شود. مدل‌ها مطابق جدول (۴) در نظر گرفته شده‌اند. در این جدول FBS معرف اتصال مرسوم بدون مقطع کاهش‌یافته، RBS-R معرف اتصال کاهش یافته به روش برش شعاعی و RWS-E اتصال کاهش یافته به روش برش بیضوی در جان تیر است.

جدول ۴ مدل‌های مورد بررسی

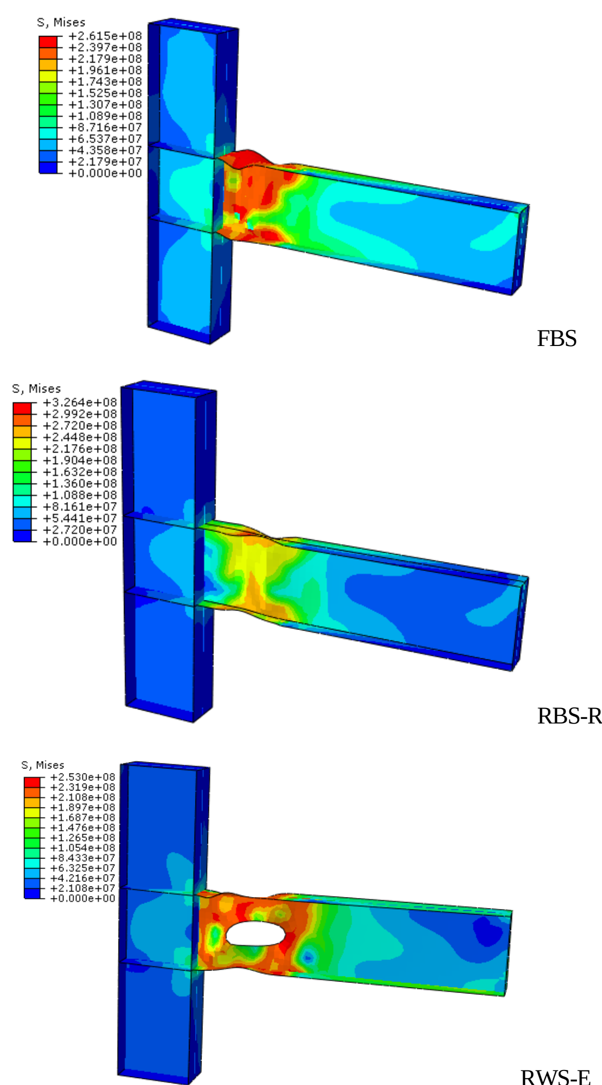
مدل	a (mm)	b (mm)	h (mm)	4c (mm)
FBS	-	-	-	-
RWS-E-0.4-0.8-0.4	۲۴۰	۴۸۰	۲۴۰	-
RBS-R-0.4-0.8-0.4	۸۱	۲۱۶	-	۲۴۰

بررسی نتایج

کانتورهای تنش به دست آمده از تحلیل‌های چرخه‌ای برای اتصالات RBS-R و RWS-E و اتصال معمولی بدون مقطع کاهش یافته (FBS) بر اساس معیار تسلیم‌شدگی فون میزز در گام نهایی بارگذاری در شکل (۱۳) ارائه شده است. تنش فون میزز (q) مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود.

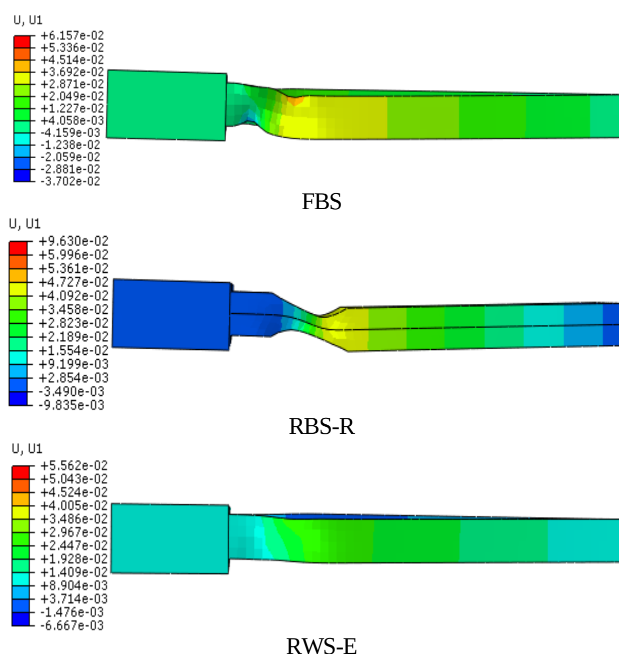
$$q = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} \quad (۱)$$

که $S_{ij} = \sigma_{ij} + p\delta_{ij}$ مؤلفه تانسور تنش انحرافی؛ p تنش هیدرواستاتیک و δ_{ij} دلتای کرونیکر می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱۳) دیده می‌شود، ماکزیمم تنش برای اتصالات RBS-R و RWS-E در ناحیه مقطع کاهش یافته در تیر رخ داده است و برای اتصال FBS تمرکز ماکزیمم در ناحیه اتصال می‌باشد. در اتصال بدون مقطع کاهش یافته ماکزیمم تغییرشکل‌ها در نزدیک بر اتصال رخ داده است در حالی که برای اتصالات کاهش یافته ماکزیمم تغییرشکل‌ها در محل مقطع کاهش یافته رخ می‌دهد. همچنین، مقدار تنش اتصالات RWS-E نسبت به اتصالات RBS-R کمتر می‌باشد.



شکل ۱۳ توزیع تنش فون میزز در گام نهایی بارگذاری

از جمله معایب اتصالات کاهش‌یافته در بال، می‌توان به امکان بروز پدیده تغییرشکل جانبی-پیچشی در تیر اشاره نمود. تغییرشکل جانبی اتصالات در شکل (۱۴) نشان داده شده است. بر اساس این شکل تحت اعمال بارگذاری چرخه‌ای، بیشترین تغییرشکل جانبی در اتصال RBS-R رخ داده است. ماکزیمم تغییرشکل جانبی رخ داده در اتصالات FBS، RBS-R و RWS-E به ترتیب ۶۱، ۹۶ و ۵۵ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۱۴ تغییرشکل جانبی اتصالات

برای ارزیابی و مقایسه شکست شکل‌پذیر دو محل در یک مدل اجزاء محدود و یا بین مدل‌های مختلف در یک محل، اندیس شکست معیار مناسبی است. اندیس شکست (Rupture Index (RI)) (RI) از رابطه (۲) به دست می‌آید.

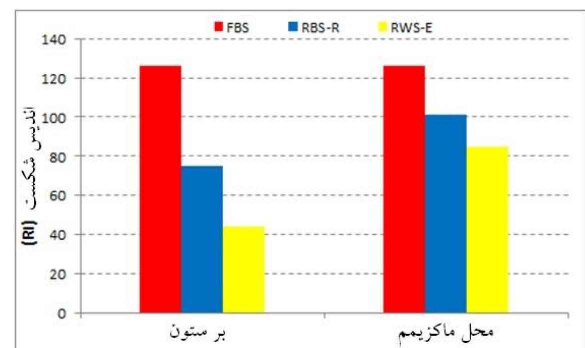
$$RI = \frac{\left(\frac{PEEQ}{\varepsilon_y}\right)}{\exp\left(1.5\frac{p}{q}\right)} \quad (۲)$$

که ε_y کرنش تسلیم است. نرخ تنش هیدرواستاتیک (Hydrostatic stress) به تنش فون-میزز $\left(\frac{p}{q}\right)$، نرخ سه محوری (Triaxiality ratio) (TR) نامیده می‌شود. همچنین، کرنش پلاستیک معادل (Equivalent plastic strain) (PEEQ) را می‌توان از رابطه (۳) محاسبه کرد.

$$PEEQ = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^{pl} \varepsilon_{ij}^{pl}} \quad (۳)$$

در این رابطه، ε_{ij}^{pl} مؤلفه‌های کرنش پلاستیک در راستاهای i و j است.

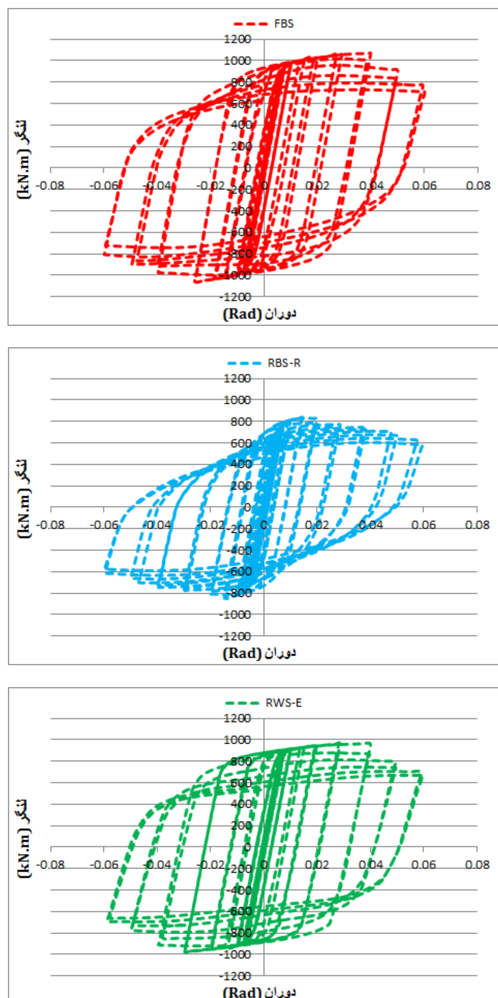
با توجه به شکل (۱۳) بیشترین تمرکز تنش‌ها برای اتصال FBS در ناحیه بر ستون می‌باشد و برای اتصالات RBS-R و RWS-E در ناحیه مقطع کاهش‌یافته رخ داده است. محل‌های تمرکز تنش‌ها نواحی مستعد رخ دادن شکست می‌باشند. بنابراین در این بخش مقدار اندیس شکست در ناحیه رخ دادن ماکزیمم تنش برای اتصالات محاسبه شد. همچنین به منظور ارزیابی امکان رخ دادن شکست جوش اتصال، اندیس شکست در ناحیه بر ستون نیز محاسبه شد. مقدار اندیس شکست در نواحی ذکر شده در شکل (۱۵) ارائه شده است. اتصال FBS دارای بیشترین مقدار اندیس شکست می‌باشد. مقدار RI برای اتصال RBS-R نسبت به اتصال RWS-E بیشتر است. اندیس شکست بالا احتمال رخ دادن پارگی در دریفت‌های پایین را افزایش می‌دهد، بنابراین پتانسیل شکست برای اتصال RBS-R و اتصال FBS نسبت به اتصالRWS-E بیشتر می‌باشد.



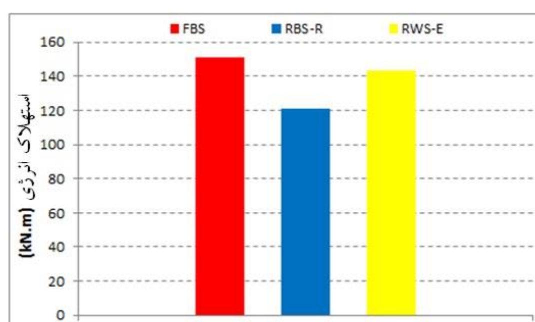
شکل ۱۵ اندیس شکست در بر ستون و محل ماکزیمم PEEQ

پاسخ هیسترزیس لنگر–دوران اتصالات در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج این شکل مشخص است ماکزیمم مقاومت خمشی برای اتصالات FBS و RWS-E در زاویه دریفت ۰/۰۴ رادیان رخ داده است و برای اتصال RBS-R در زاویه دریفت ۰/۰۲ رادیان رخ داده است و بعد از این زوایای دریفت اتصال دچار تنزل مقاومت می‌شود. نسبت مقاومت ماکزیمم به مقاومت در ۰/۰۶ رادیان برای اتصالات FBS، RBS-R و RWS-E به ترتیب برابر ۰/۶۶، ۰/۶۴ و ۰/۷۰ می‌باشد که نشان‌دهنده تنزل مقاومت کمتر اتصال RWS-E است.

طراحی شکل‌پذیر اتصالات، نیاز به استهلاک انرژی ایجاد شده در سازه ناشی از زلزله دارد. انرژی مستهلک شده از طریق سطح محصور شده به وسیله‌ی حلقه‌های هیسترزیس در هر سیکل محاسبه می‌شود. شکل (۱۷) انرژی مستهلک شده‌ی مدل‌ها را نشان می‌دهد. استهلاک انرژی اتصالات RBS-R و RWS-E به ترتیب حدود ۲۰٪ و ۵٪ نسبت به اتصال FBS کمتر است. واضح است که مدل FBS استهلاک انرژی بیشتری داشته است که دلیل آن این است که اتصال FBS دارای مدول مقطع پلاستیک بالاتر نسبت به اتصال کاهش یافته می‌باشد.



شکل ۱۶ منحنی‌های چرخه‌ای



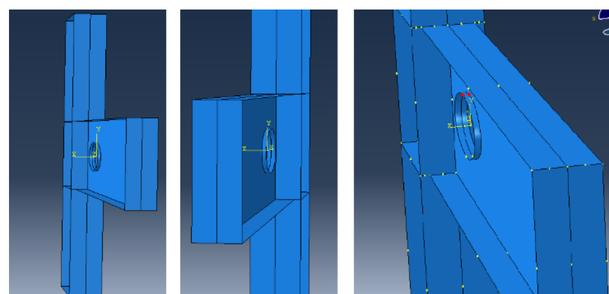
شکل ۱۷ استهلاک انرژی اتصالات

بررسی تأثیر استفاده از سخت‌کننده بر عملکرد اتصال RWS-E

در این بخش از تحقیق به بررسی تأثیر استفاده از سخت‌کننده بر عملکرد چرخه‌ای اتصالات RWS-E پرداخته می‌شود. مدل‌ها مطابق جدول (۵) در نظر گرفته شده‌اند. مدل RWS-E مدل بدون سخت-کننده و مدل‌های RWS-E-St5، RWS-E-St8 و RWS-E-St10 مدل‌های دارای سخت‌کننده هستند که در آنها ضخامت سخت‌کننده، به ترتیب، ۵، ۸ و ۱۰ میلیمتر است. شکل (۱۸) محل تعبیه سخت-کننده و نوع آن را نشان می‌دهد. در مدل‌های فوق‌الذکر، سخت‌کننده حلقوی بیضوی از هر دو طرف جان تیر به اندازه ۲,۵ سانتیمتر (پهنای کل ۵ سانتیمتر)، دور تا دور ناحیه برش خورده تعبیه شده‌اند. عرض بال تیر ۲۲ سانتیمتر و عمق مقطع تیر ۶۰ سانتیمتر است و عرض بال ستون ۳۰ سانتیمتر و عمق مقطع ستون ۶۰ سانتیمتر می-باشد.

جدول ۵ مدل‌های مورد بررسی

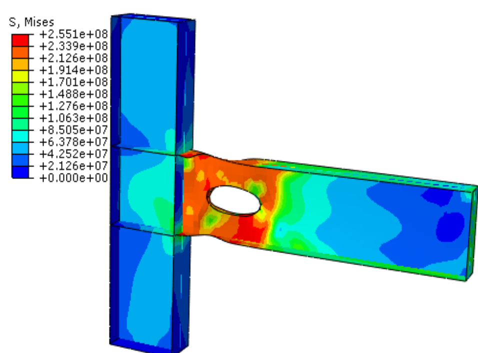
مدل	a (mm)	b (mm)	h (mm)	سخت کننده (mm)
RWS-E	۲۴۰	۴۸۰	۲۴۰	-
RWS-E-St5	۲۴۰	۴۸۰	۲۴۰	۵
RWS-E-St8	۲۴۰	۴۸۰	۲۴۰	۸
RWS-E-St10	۲۴۰	۴۸۰	۲۴۰	۱۰



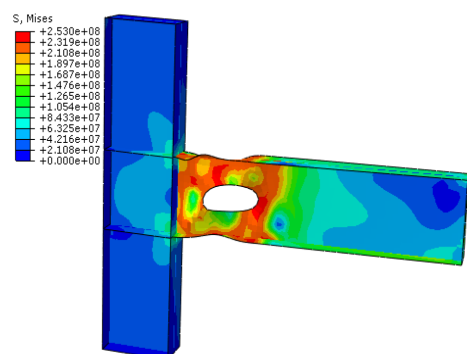
شکل ۱۸ جزئیات سخت‌کننده

بررسی نتایج

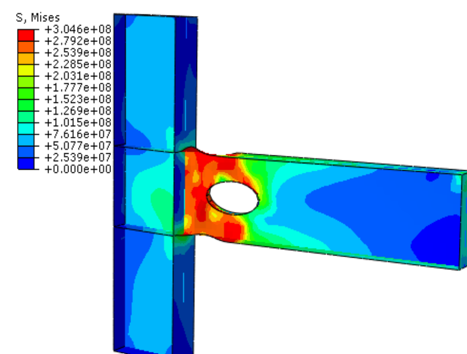
شکل (۱۹) توزیع تنش فون میزز در اتصالات را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است، استفاده از سخت کننده عملکرد اتصال را از لحاظ دور کردن تنش‌ها از بر ستون چندان بهبود نبخشیده است. با دقت در نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت ورق سخت‌کننده تنش‌ها و تغییرشکل‌ها به مقدار جزئی به بر ستون نزدیک‌تر می‌شوند.



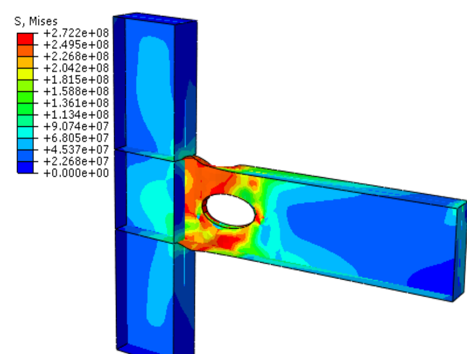
RWS-E



RWS-E-St5



RWS-E-St8

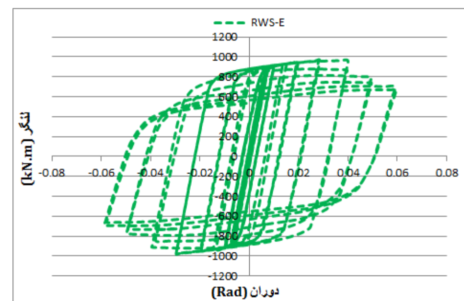


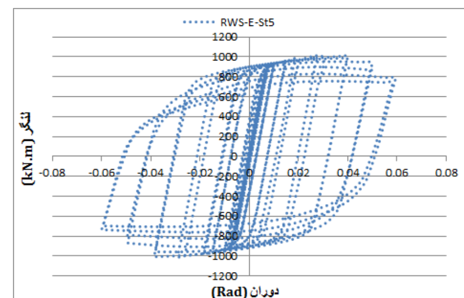
RWS-E-St10

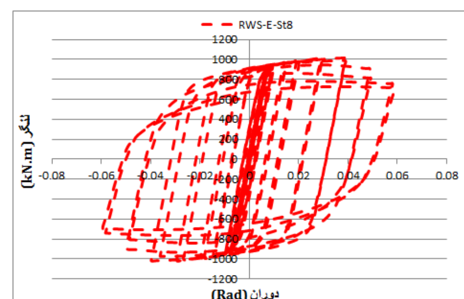
شکل ۱۹ توزیع تنش فون میزز در گام نهایی بارگذاری

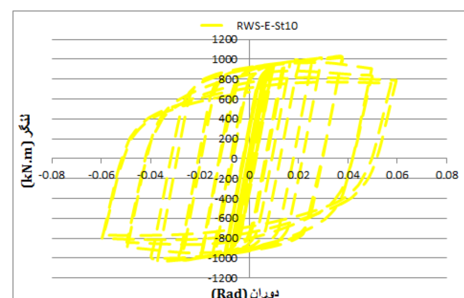
پاسخ هیسترزیس لنگر–دوران اتصالات در شکل (۲۰) نشان

داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است ماکزیمم مقاومت خمشی اتصالات در زاویه دریفت ۰/۰۴ رادیان رخ داده و بعد از این زاویه اتصال دچار تنزل مقاومت می‌شود. با دقت در نتایج این منحنی‌ها درمی‌یابیم وجود سخت‌کننده بر کاهش عملکرد چرخه‌ای اتصال تاثیر جزئی دارد. تاثیر افزایش ضخامت ورق سخت‌کننده نیز بر کاهش عملکرد چرخه‌ای اتصال ناچیز است.



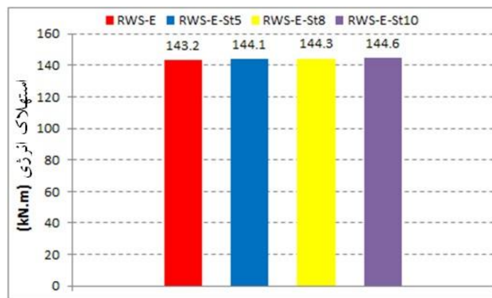






شکل ۲۰ منحنی‌های چرخه‌ای اتصالات

شکل (۲۱) انرژی مستهلک شده‌ی اتصالات را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج این شکل مشخص است استفاده از ورق سخت‌کننده به مقدار کم سبب افزایش استهلاک انرژی در اتصالات شده است.



شکل ۲۱ استهلاک انرژی اتصالات

بررسی تأثیر استفاده از سخت‌کننده بر عملکرد قاب با اتصالات RWS-E

در این بخش از تحقیق به بررسی تأثیر استفاده از سخت‌کننده بر عملکرد چرخه‌ای قاب با اتصالات RWS-E پرداخته می‌شود. مدل ها مطابق جدول (۶) در نظر گرفته شده‌اند. در این مدل‌ها که در شکل (۲۲) نیز نشان داده شده‌اند، جزئیات قاب‌ها عبارتند از: ارتفاع کامل ستون‌ها ۳٫۲ متر است؛ عمق مقطع ستون‌ها ۶۰ سانتیمتر می‌باشد؛ عرض بال ستون‌ها نیز ۳۰ سانتیمتر انتخاب شده است. همچنین، طول خالص تیر ۴٫۸ متر است؛ عرض بال تیر ۲۲ سانتیمتر می‌باشد؛ عمق مقطع تیر نیز ۶۰ سانتیمتر انتخاب شده است. علاوه بر این، در مدل‌های مذکور، سخت کننده‌های حلقوی بیضوی شکل از هر دو طرف جان تیر به اندازه ۵ سانتیمتر (پهنای کل ۱۰ سانتیمتر)، و ضخامت ۵ میلیمتر، دور تا دور ناحیه برش خورده تعبیه شده‌اند. اقطار بیضی برش خورده نیز ۲۴ سانتیمتر (قطر قائم) در ۴۸ سانتیمتر (قطر افقی) می‌باشند.

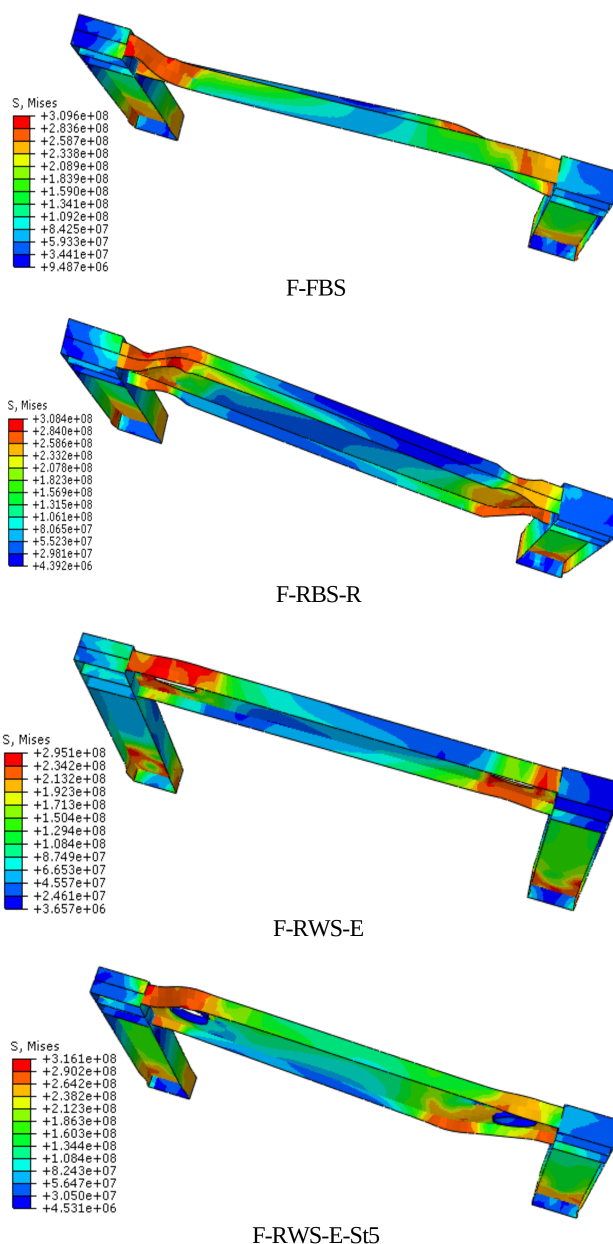
جدول ۶ مدل‌های مورد بررسی

مدل	a (mm)	b (mm)	h (mm)	4c (mm)	سخت کننده (mm)
F-FBS	-	-	-	-	-
F-RBS-R	۲۴۰	۴۸۰	-	۲۴۰	-
F-RWS-E	۲۴۰	۴۸۰	۲۴۰	-	-
F-RWS-E-St5	۲۴۰	۴۸۰	۲۴۰	-	۵

بررسی نتایج

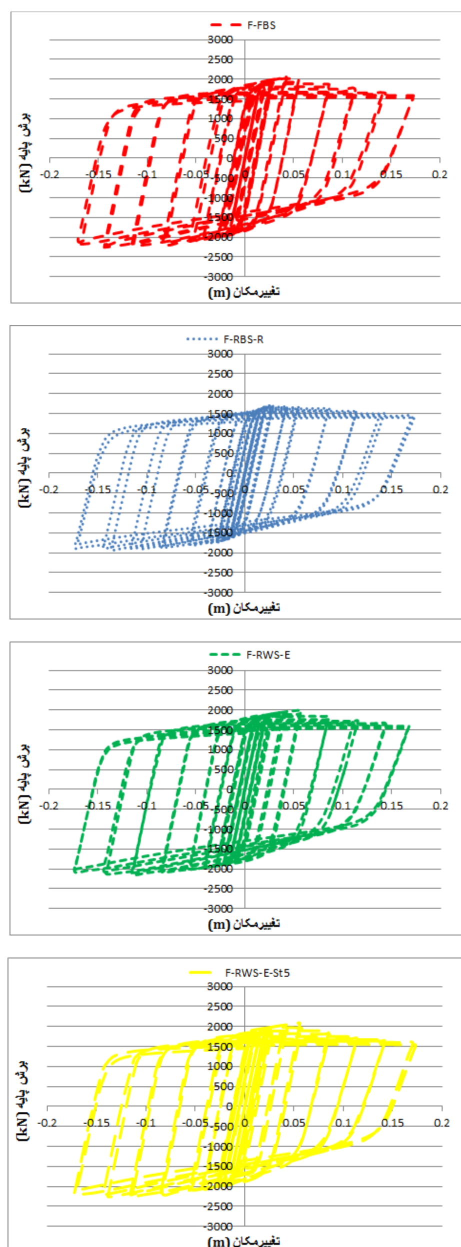
توزیع تنش فون میزز در اتصالات در شکل (۲۲) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، در قاب‌های F-FBS، F-RBS-R و F-RWS-E-St5 بیشترین تنش‌ها و تغییرشکل‌ها

در نواحی نزدیک به اتصال رخ داده است. همچنین این قاب‌ها دچار کمانش‌های پیچشی–جانبی شده‌اند. اما در قاب F-RWS-E علاوه بر دور کردن تنش‌ها از بر ستون تغییرشکل و کمانش کمتری در آن رخ داده است.



شکل ۲۲ توزیع تنش فون میزز در گام نهایی بارگذاری

پاسخ هیسترزیس برش پایه–تغییرمکان قاب‌ها در شکل (۲۳) نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج این شکل مشخص است قاب با تیر مقطع کاهش یافته ظرفیت برشی کمتری نسبت به سایر قاب‌ها از خود نشان داده است. عملکرد چرخه‌ای سایر قاب‌ها تقریبا یکسان می‌باشد. با دقت در نتایج این منحنی‌ها درمی‌یابیم استفاده از سخت‌کننده بر کاهش عملکرد چرخه‌ای تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد.



شکل ۲۳ منحنی‌های چرخه‌ای برش‌پایه–تغییرمکان

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، اثرات برش بیضوی در جان تیر، برش شعاعی در بال تیر و نیز اثر وجود سخت‌کننده تیر، بر رفتار تیر، اتصال و قاب خمشی فولادی RBS و RWS مطالعه شد. با استفاده از روش اجزاء محدود غیرخطی با المان‌های سه‌بعدی در نرم افزار ABAQUS، تحلیل‌های قاب تحت بارگذاری چرخه‌ای انجام شد. از معیار شکست فون–میزز و کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) جهت ارزیابی

نتایج استفاده شد. همچنین، به منظور اطمینان از صحت نتایج مدل-سازی‌های عددی انجام یافته، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی پژوهش‌های پیشین تطبیق داده شد.

اهم نتایج به دست آمده از این تحقیق، به صورت زیر قابل نتیجه‌گیری هستند:

اتصال با تیر مقطع کامل، بیشترین مقدار اندیس شکست را دارد. مقدار اندیس شکست برای اتصال با تیر با مقطع کاهش یافته به روش برش شعاعی در بال نسبت به اتصال با برش بیضوی در جان بیشتر است. اندیس شکست بالا احتمال رخ دادن پارگی در دریفت-های پایین را افزایش می‌دهد، بنابراین پتانسیل شکست برای اتصال با برش بیضوی کمتر می‌باشد.

نسبت مقاومت ماکزیمم به مقاومت در گام نهایی بارگذاری برای اتصالات با مقطع کامل و با مقطع کاهش یافته به روش برش شعاعی و برش بیضوی به ترتیب برابر ۰/۶۶، ۰/۶۴ و ۰/۷۰ می‌باشد که نشان‌دهنده تنزل مقاومت کمتر اتصال با برش بیضوی است.

اتصال با برش بیضوی در جان حدود ۱۵ درصد انرژی بیشتری نسبت به اتصال با برش شعاعی مستهلک می‌کند، که بیانگر شکل-پذیری بیشتر این اتصال می‌باشد.

استفاده از سخت‌کننده تاثیر کمی در ارتقاء عملکرد قاب‌های خمشی با تیر مقطع کاهش یافته دارد، زیرا علاوه بر این که محل تشکیل مفصل پلاستیک را از بر ستون خیلی دور نمی‌کند، عملکرد چرخه‌ای قاب را نیز چندان بهبود نمی‌بخشد.

با افزایش ضخامت ورق سخت‌کننده تنش‌ها و تغییرشکل‌ها به بر ستون نزدیک‌تر می‌شوند. تأثیر استفاده از سخت‌کننده و نیز افزایش ضخامت ورق سخت‌کننده بر کاهش عملکرد چرخه‌ای اتصال ناچیز است. همچنین، استفاده از سخت‌کننده، به مقدار کم، سبب افزایش استهلاک انرژی در اتصال می‌شود.

در قاب‌های جوشی با تیر مقطع کامل، با تیر با برش شعاعی و با تیر با برش بیضوی همراه با سخت کننده، بیشترین تنش‌ها و تغییرشکل‌ها در نواحی نزدیک به اتصال رخ می‌دهد. همچنین این قاب‌ها دچار کمانش‌های پیچشی–جانبی می‌شوند. اما در قاب با برش بیضوی در جان تیر علاوه بر دور کردن تنش‌ها از بر ستون، تغییرشکل و کمانش کمتری در آن رخ می‌دهد.

قاب با تیر مقطع کاهش یافته به روش برش شعاعی، ظرفیت برشی کمتری نسبت به سایر قاب‌ها از خود نشان می‌دهد.

سپاسگزاری

مراجع

[1] Jones SL, Fry GT, Engelhardt MD. Experimental evaluation of cyclically loaded reduced beam section moment connections. Journal of Structural Engineering. vol. 128, no. 4. Pp.441-51, 2002.

[2] Bertero VV. Performance of steel building structure during the Northridge earthquake. Report No. UCB/EERC-94/09. 1994.

[3] S. J. Chen, C. H. Yeh, J. M. Chu, “Ductile steel beam-tocolumn connections for seismic resistance,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 122, no. 11, pp. 1292–1299, 1996. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:11(1292)

[4] S. L. Jones, G. T. Fry, M. D. Engelhardt, “Experimental Evaluation of Cyclically Loaded Reduced Beam Section Moment Connections,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 128, no. 4, pp. 948-953, 2002. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:4(441)

[5] Zhang X, Ricles JM. “Experimental evaluation of reduced beam section connections to deep columns”. *Journal* of *Structural Engineering*. vol. 132, no.3, pp346-57. 2006;

[6] S. Kumar, and D. Rao, “RHS beam-to-column connection with web opening—experimental study and finite element modeling,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 62, no. 8, pp. 739–46, 2005. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2005.11.016

[7] SAC Joint Venture. Guidelines Development Committee, SAC Joint Venture, Structural Engineers Association of California, Applied Technology Council, California Universities for Research in Earthquake Engineering. Recommended Seismic Evaluation and Upgrade Criteria for Existing Welded Steel Moment-frame Buildings. Federal Emergency Management Agency; 2000.

[8] D. T. Pachoumis, E. G. Galoussis, C. N. Kalfas, and I. Z. Efthimiou, "Cyclic performance of steel moment-resisting connections with reduced beam sections experimental analysis and finite element model simulation," *Engineering Structures*, vol. 32, no. 9, pp. 2683-2692, 2010. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.04.038

[9] C. E. Sofias, C. N. Kalfas, and D. T. Pachoumis, "Experimental and FEM analysis of reduced beam section moment end plate connections under cyclic loading," *Engineering Structures*, vol. 59, pp. 320-329, 2014. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.11.010

[10] Code P. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance—Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. Incorporating Corrigendum March. 2010.

[11] S. El-Tawil, T. Mikesell, E. Vidarsson, S. Kunnath, "Strength and Ductility of FR Welded Bolted Connections," Report No. SAC/BD-98/01, SAC Joint Venture, Sacramento, CA, 1998.

[12] ANSI/AISC 358-16. Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications.

[13] M. Davarpanah, H. R. Ronagh, P. Memarzadeh, and F. Behnamfar, "Cyclic behaviour of elliptical-shaped reduced web section connection," *Journal of Structural Design*, vol. 24, pp. 955–973, 2020. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.02.016

[14] M. Davarpanah, H. Ronagh, P. Memarzadeh, and F. Behnamfar, "Cyclic behavior of welded elliptical-shaped RWS moment frame," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 175, pp. 106319, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106319

[15] H. R. Nazaralizadeh, H. Ronagh, P. Memarzadeh, and F. Behnamfar, "Cyclic performance of bolted end-plate RWS connection with vertical-slits," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 173, pp. 106236, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106236

[16] D. D. Yan, B. L. Zhou, X. Guo, F. Lai, X. Wei, Y. P. Xu, and M. Esfandi-Jahanian, "Investigation of behavior of interior steel connections with openings in beam web and flange under monotonic loading," Advanced Steel Construction, vol. 17, no. 4, pp. 340-348, 2021. https://doi.org/10.18057/IJASC.2021.17.4.2

[17] H. R. Nazaralizadeh, H. Ronagh, P. Memarzadeh, and F. Behnamfar, "A practical design approach to bolted end-plate vertical-slits RWS connection," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 20, pp. 547-586, 2022. https://doi.org/10.1007/s10518-021-01238-2

[18] K. D. Tsavdaridis, C. K. Lau, and A. Alonso-Rodríguez, "Experimental behaviour of non-seismical RWS connections with perforated beams under cyclic actions," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 183, pp. 106756, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106756

[19] F. F. Almutairi, K. D. Tsavdaridis, A. Alonso Rodriguez, P. G. Asteris, and M. E. Lemonis, "Hysteretic Behaviour of Composite Reduced Web Section (RWS) Connections for Seismic Applications," *Journal of Earthquake*

Engineering, 2023. https://doi.org/10.1080/13632469.2023.2204172

[20] H. Y. Chang, C. T. Liao, S. Y. Kang, S. Y. Ho, and C. M. Lai, "Seismic performance of RWS moment connections to steel box-columns and H-beams with general sections," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 201, pp. 107691, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107691

[21] H. Yu, and W. Li, "Comparison of steel frames with RWS and WFP beam-to-column connections through seismic fragility analysis," *Advances in Structural Engineering*, vol. 24, no. 8, pp. 1583-1598, 2021. https://doi.org/10.1177/1369433220977284

[22] I. Kanao, T. He, Z. Yu, K. Morisako, "Behavior of RBS Beams Reinforced by Stiffeners Subjected to Cyclic Loading," *Journal of Engineering*, vol. 2018, 2018. https://doi.org/10.1155/2018/6173873

[23] M. Tahamouli-Roudsari, H. Jamshidi, and M. M. Zangeneh, "Experimental and numerical investigation of IPE reduced beam sections with diagonal web stiffeners," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 533-552, 2018. https://doi.org/10.1080/13632469.2016.1234422

[24] American Institute of Steel Construction. Seismic provisions for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction; 2002.